

Рассмотренный вариант компенсации реактивной мощности можно считать базовым. Его улучшение возможно снижением установленной мощности ВБК за счет генерации реактивной мощности синхронным двигателем. Экономически целесообразно приведенные затраты определять с учетом стоимости НБК и ВБК, а также стоимости потерь электроэнергии в сети данного углеобогатительного предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности / И.Н. Богаенко, В.Я. Борисенко, Д.И. Розинский, Н.А. Рюмшин.-К.: Техніка, 1992.-153с.
2. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет / А.С. Овчаренко, Л.М. Робинovich, В.И. Мозырский, Д.И. Розинский.-К.: Техніка, 1985.-279с.

УДК 621.695:622.276

Е.А. Кириченко

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРЛИФТНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

У статті запропоновано інженерний метод розрахунку параметрів глибинних ерліфтів у межах феноменологічного підступу до розробки математичних моделей багатофазних течій на макрорівні, достатньо чітко відображуючих фізику підйомних процесів та механізм транспортування твердого матеріалу. Доведено окремі якісні результати розрахунку проектних та експлуатаційних параметрів установок.

Добыча полезных ископаемых при разработке глубоководных месторождений связана с осуществлением операций сбора материала на дне океана и подъема его на судно. По оценкам специалистов около 70% общих энергозатрат приходится на транспортирование добытого материала сквозь толщу воды на поверхность. Поэтому задача выбора рациональных параметров глубоководных эрлифтных установок (ГЭУ), обеспечивающих их эффективную эксплуатацию, является актуальной.

Вопросы теории трубопроводного гидротранспорта достаточно полно освещены в технической литературе, в то время как по теории пневмогидравлических (эрлифтных) установок имеются только отдельные работы.

Наиболее сложные процессы происходят в подъемной трубе, где движется трехфазный поток, характеризующийся наличием нескольких одновременно существующих структур течения смеси. Со сменой структуры течения резко изменяются закономерности основных гидравлических параметров смеси, вследствие чего исключается возможность построения единой гидродинамической модели. При этом, для описания движения транспортируемой жидкости могут использоваться математические подходы с различной степенью детализации исследуемых процессов. На самом низком иерархическом уровне находится гидравлическая модель однородной пульпы со средней скоростью и средней плотностью. На наиболее высоком – система дифференциальных

уравнений гидродинамики для отдельного описания движения твердой, жидкой и газообразной фаз, каждой со своими скоростями, плотностями и законами межфазного взаимодействия.

Однако, для решения определенного круга задач в оптимизированной постановке не требуется высокая точность результатов и допустимо оперировать более простыми моделями и расчетными данными, полученными с одинаковой погрешностью.

В основу предлагаемого феноменологического подхода положена идея модификации известных теоретических моделей газожидкостных течений с учетом активной роли твердых частиц. При этом, для повышения достоверности получаемых результатов очень важно для каждой структуры течения подобрать теоретическую модель, наиболее точно отражающую физику подъемных процессов и механизм транспортирования твердого материала.

С этой целью проведем сравнительную оценку известных теоретических моделей гетерогенных сред применительно к расчёту эрлифтных течений.

Рассмотрим пузырьковый режим течения. В работе [1] выполнен анализ формул и экспериментальных данных, в результате которого установлены три диапазона характерных размеров пузырей, для каждого из которых рекомендована формула для скорости всплывания. Также получены аналитические зависимости, связывающие отрывной радиус пузырей с размерами сопел смесителя. Исследования выполнены для коротких эрлифтов, для которых влиянием расширения воздуха можно пренебречь и которые едва ли представляют практический интерес для расчетов глубоководных эрлифтных гидроподъемов. Кроме того, возможное слияние или/и дробление пузырей в потоке делает несостоятельной расчетную схему и модель, использующие в качестве замыкающих зависимостей отрывные размеры пузырей.

Еще в 1939 г. Г.И. Белодворцев, объясняя принципы работы эрлифта, писал: "Несмотря на происходящие от естественного скольжения потери энергии, скольжение следует считать положительным фактором, так как оно является первоисточником движения газожидкостной смеси". И хотя единой точки зрения на принцип работы эрлифтов нет и сегодня, все исследователи уделяют первостепенное внимание относительно движению фаз.

В пузырьковых потоках, движущихся с низкими скоростями в вертикальных трубах большого сечения, относительное движение между пузырями и жидкостью определяется балансом сил сопротивления и выталкивания, который зависит от объемной концентрации фаз и явно не зависит от расходов. Поэтому исследование пузырькового режима целесообразно выполнять в рамках модели потока дрейфа [2]. Эта модель может быть впоследствии распространена на потоки, в которых существенны эффекты "неоднородности", а также полезна при исследовании переходных процессов в элементах ГЭГ.

Так как пузырьковый режим течения не реализуется при больших объемных

газосодержаниях, относительная скорость пузырей мала, а плотность жидкости намного больше плотности газа, то течение практически является изотермическим. В этом режиме осуществляется гидротранспорт твердого материала, однако несущей средой является водовоздушная смесь.

С увеличением объема пузырей происходит их столкновение и соединение в снаряды. Снарядная структура течения характеризуется чередующимся прохождением крупных газовых пузырей, имеющих форму снарядов, и жидких пробок. Скорости твердых частиц на границе раздела фаз претерпевают скачкообразные изменения за счет различной транспортирующей способности несущей среды, но при этом имеют четкий периодический характер. Причем в пределах одного периода твердые частицы, в зависимости от гранулометрического состава, могут совершать как восходящее, так и нисходящее движение с переменной скоростью. С учетом вышесказанного представляется целесообразным определение параметров снарядного потока по величине, осредненной за период скорости в рамках сплошной модели [3]. Такая постановка задачи предполагает использование одного уравнения движения для смеси с привлечением замыкающих эмпирических зависимостей, справедливых для параметров натуральных установок.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований двухфазных течений [3] позволяют сделать вывод о том, что наиболее важными характеристиками, определяющими гидродинамику потока, являются истинное объемное газосодержание  $\varphi$  и коэффициент гидравлического сопротивления смеси  $\lambda_c$ . Поэтому, определение  $\varphi$  и  $\lambda_c$  целесообразно проводить с помощью эмпирических соотношений, а не расчетным путем, что повышает надежность результатов моделирования.

Получение надежных экспериментальных зависимостей требует проведения многочисленных экспериментов на трубах различных диаметров в широком диапазоне изменения физических и расходных параметров течения. Обобщение экспериментальных данных и перенос их на натурные условия эффективно выполнить на основе теории подобия, позволяющей в компактной форме анализировать большое число взаимовлияющих факторов. В работе [3] получены формулы для определения  $\varphi$  и  $\lambda_c$  в виде функциональных зависимостей от определяющих критериев снарядного течения, справедливые для натурального диапазона изменения скоростей и автомодельные по диаметру трубы.

При достижении более высоких скоростей смеси газ в виде кольца (кольцевой режим) в центре трубы отбрасывает жидкость к периферии. При этом жидкостный слой имеет волнистую границу раздела. Жидкие волны дробятся и втягиваются в центральный газовый столб в виде мелких образований. Жидкость движется вверх в основном благодаря силам сопротивления, возникающим на границе раздела, следовательно, касательные напряжения на границе раздела фаз должны компенсировать действие силы тяжести на жидкость и обеспечить ее вертикальное движение. Наиболее детальный анализ кольцевого режима ос-

нован на использовании уравнений неразрывности, движения и энергии отдельно для каждой фазы (модель раздельного течения [2]), а для "склеивания" решений на границе раздела фаз используются различные формы межфазного взаимодействия. То есть увеличение точности метода достигается путем его усложнения. Многолетний опыт работы авторов в области многофазных сред позволил сформулировать принцип, согласно которому точность математической модели должна соответствовать точности физических допущений при ее формировании. Тем не менее, модель раздельного течения при исследовании кольцевого потока представляется более перспективной, так как более точно "чувствует" физику процесса транспортирования твердого материала.

При дальнейшем возрастании скорости потока весь пристенный слой жидкости вовлекается в газовое ядро и образуется дисперсная структура течения смеси в виде водяной пыли с твердыми включениями. При дисперсной структуре капли жидкости опережают твердые частицы, практически приближаясь к скорости газа. Таким образом, несущей средой является водяная пыль. Так как дисперсная структура реализуется на коротких участках подъемной трубы и соответствует максимальным скоростям движения смеси, то течение в плане межфазного обмена можно считать динамически равновесным и изолированным по теплу. С учетом этих допущений параметры дисперсного потока целесообразно рассчитывать, используя гомогенную модель [2].

Результаты выполненного анализа явились основой для разработки инженерного, физически обоснованного метода расчета параметров ГЭУ, точность которого напрямую зависит от достоверности используемых опытных коэффициентов. Это обстоятельство в значительной степени определяет перспективность разработанного метода, так как все рассмотренные модели максимально открыты для использования новой эмпирической информации.

Анализ причинно-следственных связей механизма работы ГЭУ [4] дал возможность сформировать управляющий вектор, позволяющий на стадии проектирования выбрать рациональные параметры установок. Координатами вектора являются: глубина разработки месторождения, производительность установки по твердому, глубина погружения смесителя, диаметры подводящей, подъемной и воздушной труб, расходная концентрация твердой фазы, крупность твердых частиц, потребный расход воздуха, тип и число компрессоров. В результате многофакторной оптимизации энергозатрат [4], выполненной на базе разработанного инженерного метода, каждой паре исходных данных (глубина разработки и производительность по твердому) поставлено во взаимно-однозначное соответствие набор конкретных значений конструктивных (глубина погружения смесителя, диаметры трубопроводов) и расходных (концентрация и крупность твердого, расход воздуха) параметров. Процедура предусматривает, что изменение любого из управляющих параметров автоматически приводит к новому набору управляемых

параметров, соответствующих минимальному значению удельной мощности сжатого воздуха  $N_3$ .

Анализ результатов числовых экспериментов позволил выделить наиболее значимые конструктивные параметры, определяющие энергетику установок, и дать физическую интерпретацию происходящих процессов, что дало возможность более обоснованно подойти к проектированию ГЭУ, сузить область определения экстремума, а также уменьшить количество и время необходимых расчетов.

В результате моделирования установлено, что увеличение диаметра проводящей трубы в исследуемом диапазоне улучшает энергетику установок, однако, начиная с некоторой величины, скорость пульпы может оказаться меньше критической, что приводит к срыву подачи твердого.

С увеличением глубины погружения смесителя к.п.д. установок возрастает и достигает максимального значения в случае наиболее выгодного соотношения между полезной мощностью, расходуемой на подъем твердого, и минимально допустимой затраченной мощностью потока сжатого воздуха.

Для снижения высоких скоростей пульпы в верхних сечениях подъемной трубы и ударных нагрузок на воздухоотделитель (вследствие поворота потока на 180 градусов) целесообразно применить ступенчатое расширение трубы вблизи поверхности моря, что также приводит к снижению потребного расхода воздуха и повышению к.п.д. Причем на величину к.п.д. влияют как величина, так и местоположение ступени. Предложена расчетная схема оптимизации ступени по двум переменным.

При некотором характерном диаметре пневмопровода давление сжатого воздуха на выходе компрессора совпадает с его давлением в смесителе, так как гравитационная составляющая полностью уравнивается диссипативными потерями. При больших значениях диаметра пневмопровода вес вертикального столба сжатого воздуха выполняет роль дожимного компрессора, что позволяет использовать источник пневмоэнергии с давлением, меньшим, чем давление вдува, и делает энергетический режим менее напряженным. Расчеты показали, что приращение давления сжатого воздуха в пневмопроводе составляет 13...17% от рабочего давления компрессора.

С уменьшением диаметра твердых частиц в широком диапазоне уменьшается потребный расход воздуха, обеспечивающий заданную производительность ГЭУ, что приводит к повышению к.п.д. установок и делает предварительное дробление твердой фазы перед подъемом эрлифтом целесообразным до размера 2...5 мм.

В процессе эксплуатации исходные данные могут изменяться. В этой связи актуальна задача регулирования расхода сжатого воздуха с целью поддержания параметров рабочих режимов в зоне их оптимальных значений при изменении расхода твердого материала.

В качестве энергетической характеристики эксплуатационных режимов принята мощность на валу компрессора, отнесенная к производительности эрлифта по твердому:

$$N_3 = P_a Q_a \ln\left(\frac{P_k}{P_a}\right) \frac{1}{M_m} \cdot \frac{1}{\eta_k} \cdot \frac{1}{\eta_p}$$

где:  $\eta_k$  – изотермический к.п.д. компрессора;  $\eta_p$  – к.п.д. регулирования компрессора;  $P_a$  – атмосферное давление;  $P_k$  – давление компрессора;  $Q_a$  – расход свободного воздуха;  $M_m$  – массовый расход твердого.

Большая инерционность системы управления ГЭУ (в плане запаздывания сигналов в управляющих каналах) накладывает жесткие требования на быстродействие расчетных моделей. В противном случае длительный поиск оптимальных режимов с последующими настройкой и контролем могут свести на нет эффект от оптимизации. Поэтому при анализе эксплуатационных режимов (сравнительная оценка вариантов) в общем случае также допустимо ограничиться результатами приближенных расчетов, полученных на базе разработанного инженерного метода.

В результате установлено, что выбор параметров режима работы эрлифта, отвечающего минимальному значению удельной мощности потока, подведенного к смесителю сжатого газа, без учета потерь давления в пневмосети и потерь на регулирование компрессора, приводит к увеличению удельной мощности на валу компрессора на 4...20 % от величины затраченной мощности установки. При этом характеристики питающей пневмосистемы ограничивают область возможных эксплуатационных режимов.

В результате анализа параметров области возможных эксплуатационных режимов установлено взаимно-однозначное соответствие между значениями производительности эрлифта по твердому и расходами воздуха, определяющими минимальную энергоемкость ГЭУ. Параметры установленной зависимости являются исходными данными для разработки технического задания на регулирование компрессора с целью обеспечения эффективной эксплуатации глубоководных эрлифтных установок при изменении расхода твердой фазы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Е. Давидсон Основы гидравлического расчета эрлифта. Днепропетровск, ДГУ, 1986. 67с. с ил.
2. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир. 1972.-440 с.
3. В.А. Мамаев и др. Движение газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра. 1978.-270с.
4. Е.А. Кириченко. Выбор и обоснование рациональных параметров глубоководной эрлифтной установки с учетом влияния питающей пневмосистемы: Дис...канд. техн. наук. – Днепропетровск 1989., 170 с.